

マイクロストリップアンテナの基礎と多機能化

Fundamental and Functionalization Technologies of Microstrip Antennas

西山 英輔

Eisuke NISHIYAMA

佐賀大学

概要

マイクロストリップアンテナは、誘電体基板の上面にアンテナ素子を下面に接地導体を配置した平面アンテナの代表例の一つで、薄型で軽量である特徴を持つ。一方で、無線を利用したシステムの多様化に伴い、5Gの実用化に代表されるようにアンテナの性能・機能の向上が求められている。ここでは、マイクロストリップアンテナに注目し、その基礎的な動作や特性などを説明し、無線通信システムの多様化に対応するアンテナの多機能化への導入について説明する。

Abstract

Microstrip antennas are one of planar antennas that useful mobile communications, have a low-profile and light weight. On the other hand, with the diversification of wireless systems, improvements in antenna performance and functions are required, as represented by the practical application of 5G. We focus on microstrip antennas, explain its basic operations and characteristics. Also, we explain the introduction of antennas to multifunctionalities in applied to the diversification of wireless communication systems.

1. はじめに

社会の高度情報化が日々進展する中で、情報通信の高速化、大容量化、高信頼性が益々求められている。同時に情報通信の多様化も進み、その結果、より高性能・高機能な通信機器の開発の重要性が増し、情報通信の発展に不可欠となっている。通信衛星を利用した全世界的規模の通信もそのひとつである。無線通信への依存度は今後さらに増大し、その多種多様な要求に対応するために、アンテナについてもその多機能化が求められており、超高周波(ミリ波等)帯の利用技術および新しい通信方式の開拓が必要になってきている。

その中で、マイクロストリップアンテナは形状が薄型であり、その製作の容易さから無線通信用アンテナとして非常に有用なアンテナのひとつであり、上記のような要求に対応するアンテナとして盛んに研究が進められている[1, 2]。これまでに、指向性可変機能やマルチビームアンテナ、偏波共用アンテナ、周波数可変機能やマルチバンドアンテナなど、これまでに多種多様な特性を有する多機能アンテナが報告されている。エスパアンテナ、バトラーマトリックスを用いたアンテナや UWB 用アンテナ等がその例である。更に近年、リコンフィギュラブルアンテナ(Reconfigurable Antennas) [3-7] が注目され多様なアンテナが提案されている。ここでは、まずマイクロストリップアンテナの基礎について説明し、それをもとに多機能アンテナの導入について説明する。文献[8]には、「アンテナは、電気回路の電力を電波のエネルギーに変換して、それを空間に放射、あるいは電波よりエネルギーを吸収して電力に変換し、それを電気回路に伝達する目的で設計された特殊な電気回路である。」のように、アンテナが解釈されている。

ここでは、「アンテナ」を「広義のマイクロ波回路」とする概念を導入し、多機能アンテナの基となるマイクロストリップアンテナの共振モードに着目し、アンテナの基本動作や特性について説明する。加えて共振モードと密接に関連付けて多機能アンテナについて解説する。

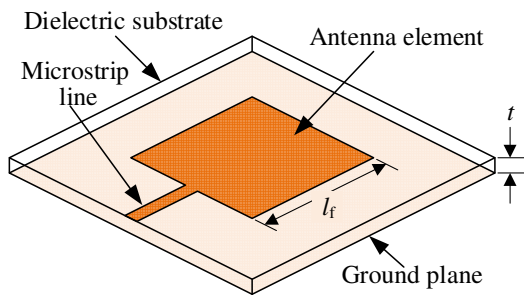


図1 マイクロストリップアンテナ

2. マイクロストリップアンテナ

マイクロストリップアンテナは、波長に比べて十分に小さい厚さの誘電体基板上に、エッチングなどでアンテナ素子が形成される(図1)。そのアンテナ素子には同軸またはマイクロストリップ線路で給電されて、アンテナ素子と接地板との間に固有の共振モードが励振し、電波を放射する。このような方形のアンテナ素子に給電すると、図2の(a)、(b)にそれぞれ示すような、電圧分布と電流分布になる。給電点を含む x-z 平面内の断面における電気力線は、図2(c)の矢印ようになる。電気力線はアンテナ素子と接地板に挟まれた領域だけでなく、その外側に漏れていく成分が存在し、外へ電力が漏れ(縁端効果)ていく。これがマイクロストリップアンテナの放射で、この漏れを積極的に利用する。図1に示すような方形マイクロストリップ素子では、上記のように電磁界が一部外部に漏れるため、アンテナ素子の実効的な大きさは、アンテナ素子の実際の大きさより大きくなる。その共振周波数 f_r は境界における縁端効果を考慮した等価辺長 l_{eff} を用い式(1)で表される[9]。

$$f_r = \frac{c_0}{2l_{\text{eff}}\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

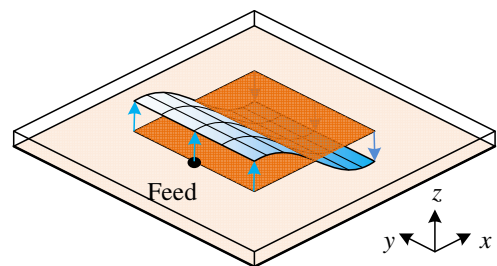
$$l_{\text{eff}} = l_f \left\{ 1 + 0.824 \frac{t}{l_f} \frac{(\epsilon_r + 0.3)[(l_f/t) + 0.262]}{(\epsilon_r - 0.258)[(l_f/t) + 0.813]} \right\}$$

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 10 \frac{t}{l_f} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

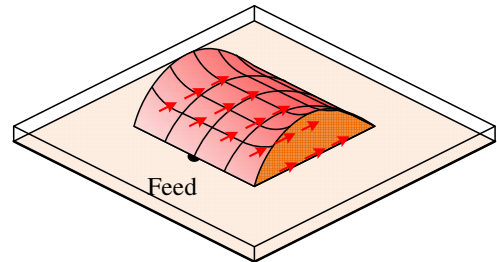
ここでは、アンテナの特性を Keysight Tautology の電磁界シミュレータ EMPro を用いて解析している。

3. マイクロストリップアンテナの基本動作

マイクロストリップアンテナは共振型のアンテナで、一般的には基底の共振モード TM_{10} を利用する。その共振の様子を図2に示す電圧分布と



(a) 電圧分布



(b) 電流分布



(c) 断面の電気力線

図2 電圧と電流分布

電流分布の概要で説明する。電圧分布では y 軸に沿ったアンテナ素子の両方のエッジで大きくなり、中央で零になる。また電流分布では、アンテナ素子の中央で大きくなり、y 軸に沿った両方のエッジで零になる。さらには、x 軸に沿ったエッジに電流は集中して流れる。

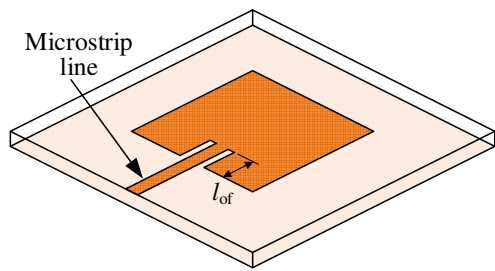
4. 給電方法

マイクロストリップアンテナには2つの給電方法がある。その方法を図3に示す。それらは、マイクロストリップ線路による給電(a)と背面から同軸ケーブルによる給電(b)である。アンテナの断面(x-z)における電圧分布と電流分布は図3(c)のようになるので、給電点がアンテナ素子のエッジ近いほど入力インピーダンスは高くなり、中央に近づくに従ってそれは低くなる。アンテナの入力インピーダンスは給電点のエッジからの距離 l_{of} で設定できる。すなわち、給電線との整合設計が l_{of} の調整で可能になる。

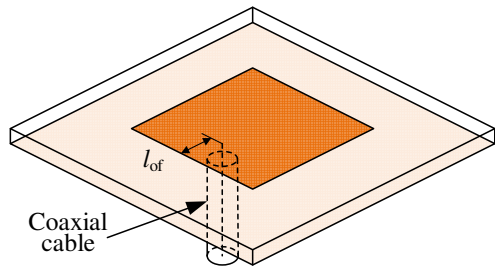
5. 基本特性

(a) 入力インピーダンス

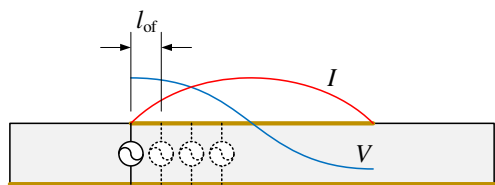
給電点をアンテナ素子のエッジから l_{of} 離れた



(a) マイクロストリップ線路による給電



(b) 同軸ケーブルによる給電



(c) オフセット給電

図3 給電方法

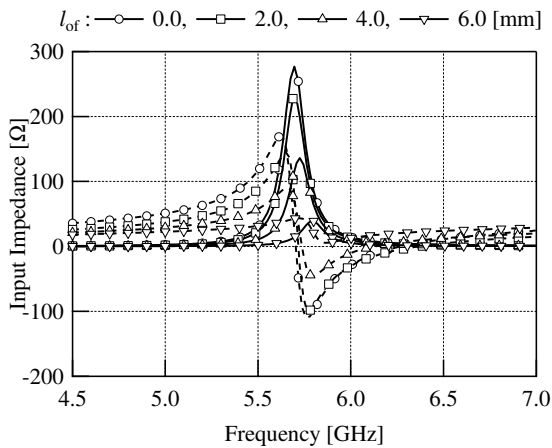


図4 インピーダンス特性

($l_f=16.5$ mm, $t=0.8$ mm, $\epsilon_r=2.15$)

位置に置いた場合の入力インピーダンスを図4に示す。基底共振モードでは、並列共振器のインピーダンス特性となる。給電点がアンテナ素子のエッジに近い場合に共振周波数での抵抗成分は高く、中心に近づくに従い低くなる。

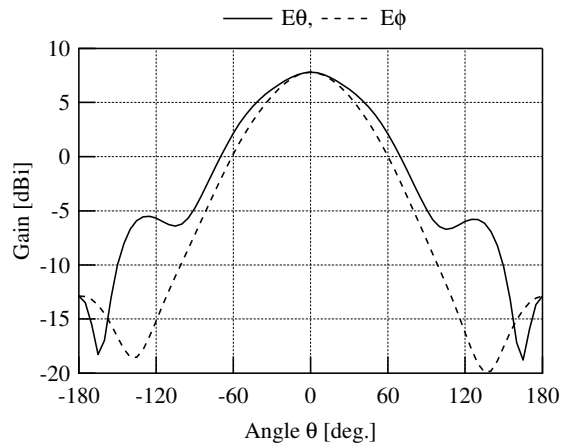
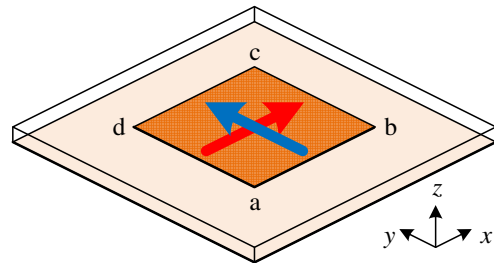
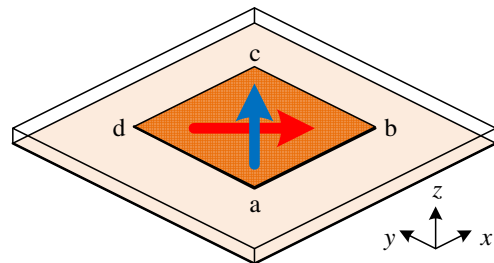


図5 指向性パターン

($l_f=16.5$ mm, $t=0.8$ mm, $\epsilon_r=2.15$
frequency=5.8 GHz)



(a) 辺に沿った方向の共振



(b) 対角方向の共振

図6 直交共振モードの励振

(b)放射指向性

図5に放射指向性パターンを示す。アンテナ正面に最大方向を持つ担方向指向性を有する。比誘電率2~3の基板を選ぶと6~8 dBiの絶対利得が得られる。

6. 共振モード

マイクロストリップアンテナでは、複数の直交する共振モードを励振することができる。直交共振モードはお互いに独立であるために、その組み合わせで自在に所望の共振モードを形成できる。一般的に、方形のマイクロストリップアンテナで

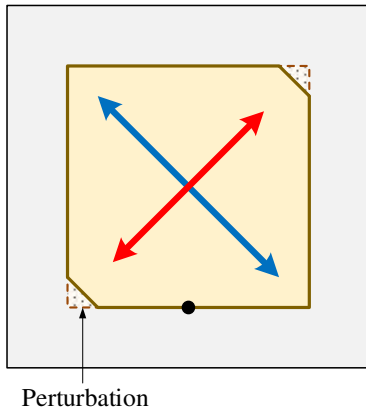


図7 円偏波の励振

は、給電方法に依存するが、2つの直交する共振モード対(図6)を励振することができる。(a)は辺に沿った方向に共振する2つの直交共振モード対で、(b)はa-cとb-dの対角方向に共振する直交共振モード対である。通常のマイクロストリップアンテナでは、2つの共振モードが縮退している。

7. 偏波

給電点がy軸に沿ったエッジの中央にある場合には、電流が図2(b)のように流れるために偏波は、x-z平面内で電界が振動する直線偏波である。一方、給電点をx軸に沿うエッジに選ぶと、 TM_{01} モードが励振されアンテナ素子上の電流はy軸に沿って流れ、偏波面はy-z平面になる。 TM_{10} と TM_{01} は、お互いに空間で直交する共振モード(図6(a))であるために、1つのアンテナ素子に同時に励振が可能である。

図2に示すようにマイクロストリップアンテナを励振した場合、アンテナ素子の対角方向で共振するモードが縮退するために、一つの共振モードとして動作する。この状態で、アンテナ素子に縮退を分離する摂動素子を加えると、2つの直交する共振モードが励振する(図7)。この分離した共振モードの振幅比と位相差はこの摂動素子の大きさで決定する。大きさを適切に選ぶことで、同振幅と90度の位相差の条件が得られ、アンテナ素子から円偏波を放射する。

8. 誘電体による特性

アンテナを構成する誘電体基板のパラメータによるアンテナ特性について説明する。アンテナ素子の大きさ l_f と基板の厚さ t に対するアンテナの共振周波数を図8に示す。式(1)のように、 l_f が

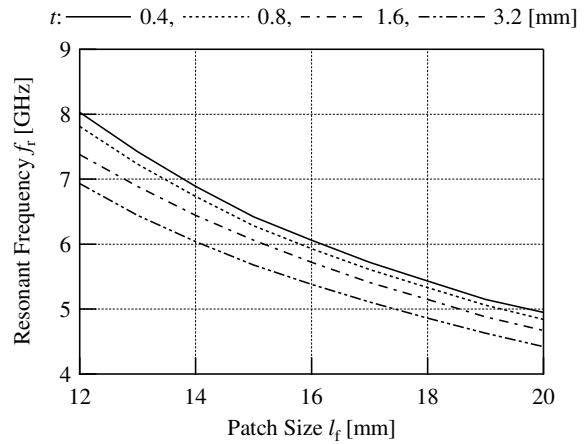


図8 アンテナ素子の大きさと基板の厚さに対する共振周波数 ($\epsilon_r=2.15$)

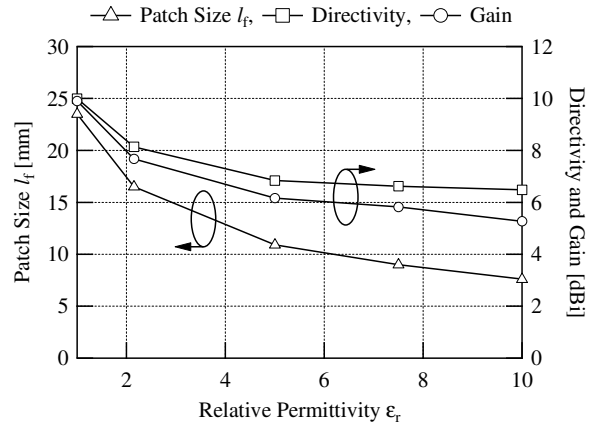


図9 基板の誘電率に対する特性 ($t=0.8$ mm, Frequency=5.8 GHz)

おおよそ1/2管内波長になっており、アンテナ素子の大きさを大きくするに従い、共振周波数は低くなる。一方、基板厚 t を厚くすると共振周波数が低くなる。これは、基板厚を厚くすると、図2(c)に示すようにアンテナ素子の外側に漏れる成分が増え、境界における縁端効果が大きくなり、等価長が長くなるためである。縁端効果の増加により放射効率も向上し、利得が高くなる。

図9に基板の比誘電率 ϵ_r に対するアンテナ素子の大きさと指向性利得、絶対利得の特性を示す。基板の誘電正接 $\tan\delta$ を0.0015、アンテナ素子の導体の伝導率を 5.8×10^7 S/mとして計算している。アンテナ素子の大きさは、それぞれの比誘電率 ϵ_r に対して共振周波数 f_r が5.8GHzになるようにしている。比誘電率 ϵ_r を大きくするに従い、アンテナ

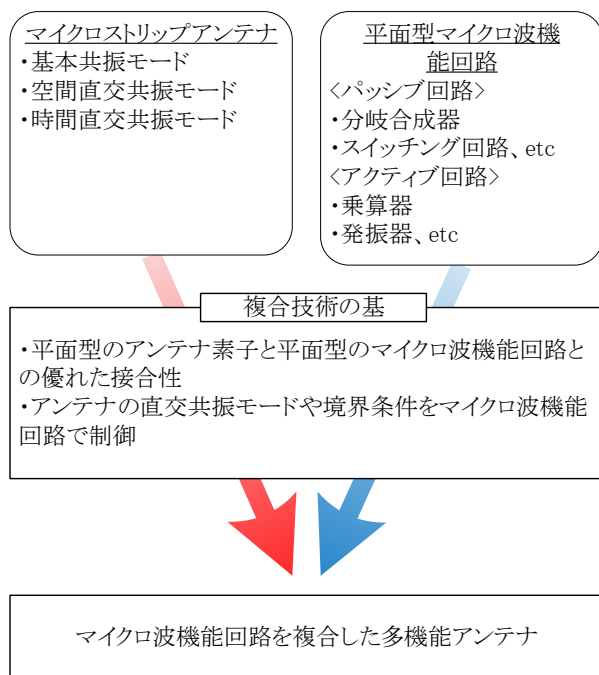


図 10 複合のコンセプト

ナ素子の大きさが小さくなる。すなわち、高誘電率の基板を用いるとアンテナの小型化ができる。しかしながら、同時にアンテナの利得と放射効率が低下する。

9. マイクロ波回路を複合した多機能アンテナ

(a) 多機能アンテナ

ここでは、電波を放射したり受けたりするアンテナ本来の機能に加え、特性を可変化あるいはマルチ化したアンテナを多機能アンテナと呼ぶ。アンテナの特性は、主に指向性、偏波特性とインピーダンス特性の3つである。一般的なアンテナでは、それらの特性は固定であり、それに対して、多機能アンテナは特性に新たな可変機能等を加え具備する。例えば、マルチビームやビームの可変機能、偏波共有機能や偏波切替機能、マルチバンドや動作周波数可変機能である。この多機能アンテナを実現するために、アンテナの共振境界条件の制御の技術を活用する。

(b) 複合コンセプト[10,11]

ここでは、マイクロ波帯のアンテナや電気回路に注目し、「アンテナ」を「広義のマイクロ波回路」とする概念を導入し、アンテナの動作を共振モードと密接に関連付けて多機能アンテナを説明する。「アンテナ」を、空間と電気回路のインターフェイスと位置づけし、「マイクロ波機能回路」はアンテナに形成される所望の共振モードを

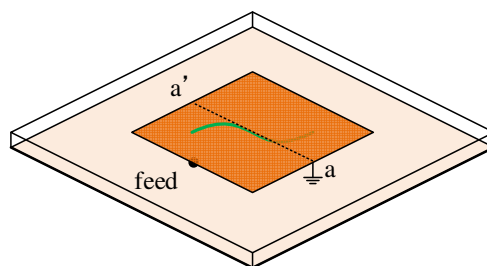
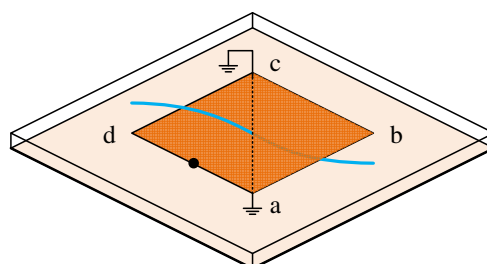
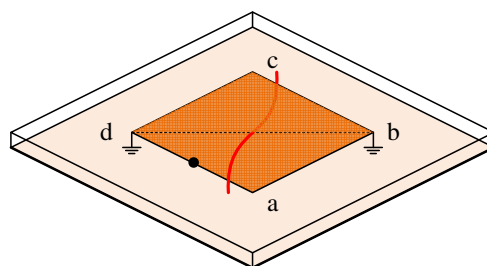


図 11 マイクロストリップアンテナの基本共振モード



(a) a-c 間を接地



(b) b-d 間を接地

図 12 アンテナ素子の角を接地したマイクロストリップアンテナ

多様に構築するためのコンポーネントとしている。図 10 に複合技術の概要を示す。多機能アンテナは、「アンテナとマイクロ波機能回路との複合技術」が主軸となって構成されている。「アンテナとマイクロ波機能回路との複合技術」とは、アンテナとマイクロ波伝送線路等のマイクロ波回路や各種ダイオードに代表される半導体デバイスとを一体複合化することで、目的とする多機能の実現に必要な共振モードを形成する技術である。

(c) アンテナの共振モードの活用

図 10 に示すように、複合におけるアンテナに着目する点は、基本共振モードと複数の直交共振モードの利用である。いかに共振モードを活用するかが、多機能化のポイントとなる。分配合成回路や乗算器をはじめとするマイクロ波機能回路

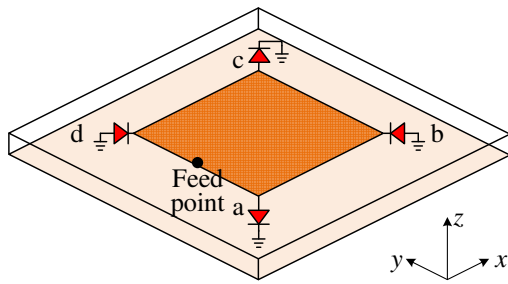


図 13 実際のアンテナ

は、アンテナに生じる共振モードを自在に合成したり可変したりして多機能化を実現するために活用する。

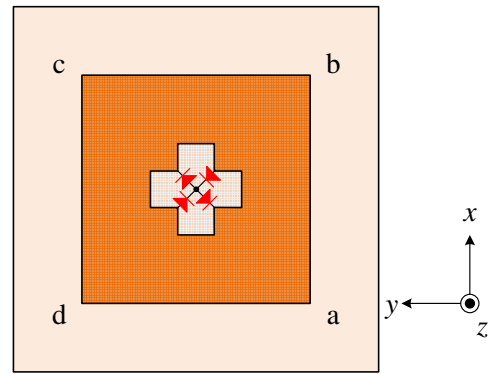
(d) アンテナの境界条件と共振モード

新たに可変の境界条件を加え共振モードを変化させる方法に次の 2 種類がある。

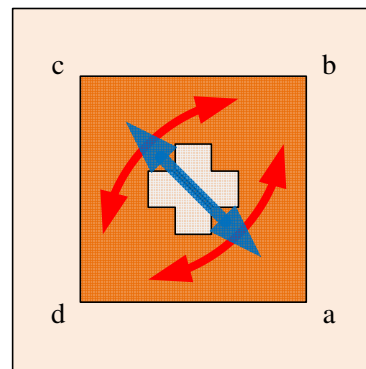
- ・電圧境界条件追加型
- ・電流境界条件追加型

電圧境界条件追加型は、アンテナ素子と接地板間に境界条件を新たに加えることで、共振モードを変化させる。電圧に対する境界条件の設定方法である。図 11 にマイクロストリップアンテナの基本共振モードの TM_{10} の電圧と電流様子を示す。a-a' 間は電圧が null であるため、そこを接地しても共振モードに変化はない。次に、図 12 にアンテナ素子の角を接地したマイクロストリップアンテナを示す。(a) に a 点と b 点をアンテナ素子と接地板と接続した場合、(b) に点 b と点 d を接続した場合の共振モードの様子を示す。a 点と c 点を接地板と接続することで、a-c 間で電圧が null となるように、b-d 方向に振動する共振モードとなる。一方、b 点と c 点を接地板と接続することで、b-d 間で電圧が null となるように、a-c 方向に振動する共振モードとなる。この様に、境界条件により、2 つの直交する共振モードが励振できる。

電流境界条件追加型は、アンテナの面内に平行に境界条件を加える方法で、電流に対する境界条件である。電流境界条件追加型のアンテナとして、アンテナ素子の中央に長方形のスロットを設け、その中央に可変の境界条件を加えた動作周波数可変アンテナを例に説明する。スロットの中央を開放と短絡した場合で電流の境界条件を設定する。それぞれ、アンテナ上のスロットを回避するように流れる電流で共振し、一部がスロットの中央を通る経路で流れる電流で共振する。このよう



(a) 構造



(b) 動作原理

図 14 円偏波切替アンテナ

な境界条件により、動作周波数が異なる共振モードが励振できる。

実際の境界条件の可変には、マイクロストリップアンテナのアンテナ素子に直接半導体デバイスを実装し、そのバイアスで境界条件を制御する。図 12 で示した直交共振モードを利用した多機能アンテナの例として、スイッチングダイオードを実装した偏波可変アンテナを説明する。図 13 に基本共振モードを利用した多機能化した実際アンテナの構成例を示す。可変容量コンデンサをアンテナ素子に直接実装している。バイアス電圧によるスイッチングダイオードの状態の遷移でアンテナの境界条件を可変する構造である。これにより、共振モードに対応した偏波可変機能が実現できる。

10. 多機能アンテナの実際

円偏波角を可変にする多機能マイクロストリップアンテナの実際の例について解説する。一般にはマイクロストリップアンテナは 2 つの直交共振モードが縮退した状態で励振する。これに図

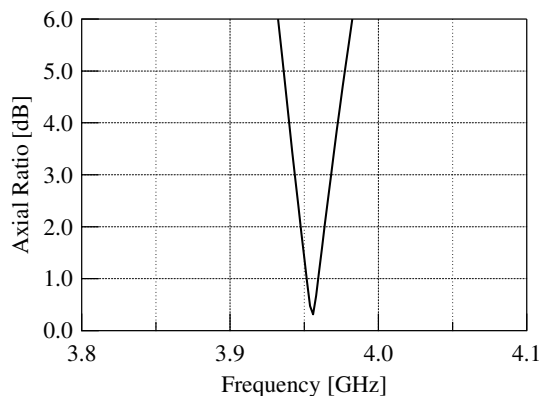


図 15 軸比の周波数特性

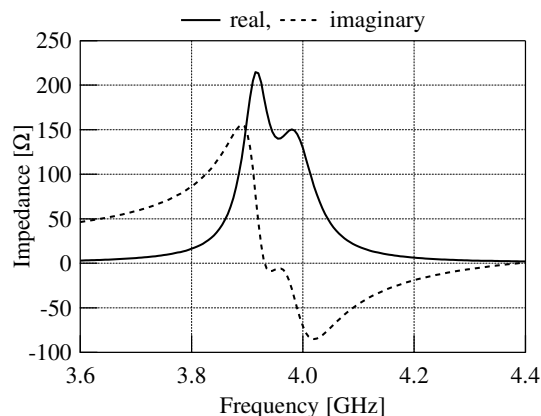


図 16 入力インピーダンス

7 に示すように摂動素子を追加することで、2 つの直交共振モードが発生し、摂動素子を調節することで円偏波を励振する。この直交共振モードを調整する摂動素子の条件をスイッチングダイオードで切り替えて、円偏波切り替え機能を実現する。

図 14 に直交するモードを利用した円偏波可変アンテナの構造を示す。方形のマイクロストリップアンテナとアンテナ素子中央に配置した十字型スロットとダイオードをスター型に配置し装荷した構成である。正方形のマイクロストリップアンテナの中央に十字型のスロットを設ける。そのスロットに 4 つのスイッチングダイオードをスター型に接続し装荷する。ダイオードの接続点はビアで接地板と接続する。アンテナの主励振モードでは、アンテナの中央は電圧ヌル点なので、その周波数帯ではアンテナ特性に影響を与えない。RF 信号にスイッチングダイオードのバイア

ス電圧を重畳し、ダイオードの ON-OFF 状態を制御する。バイアス電圧に対するアンテナの状態と電流の流れる向きを模式的に図 14(b)に示す。a-c 方向と b-d 方向のダイオードは、それぞれ ON(導通)、OFF(開放) 状態となる。その結果、アンテナはスロットを回避する電流とスロット中央を流れる電流の 2 つの直交共振モードが励振される。スロットサイズを適切に選ぶことで、2 つの共振モードが同振幅で 90 度の位相差で励振する。その結果、円偏波を放射する。アンテナのシミュレーション結果の軸比の周波数特性と入力インピーダンス特性をそれぞれ、図 15 と 16 に示す。軸比 1dB 以下の円偏波特性を得ている。ただし、縮退分離型のために軸比の周波数特性が狭帯域である。入力インピーダンスは、2 つの共振モードが確認できる。印加するバイアスの極性を逆にすることで、ダイオードの ON-OFF 状態が切り替わり、円偏波の旋回方向が反転する。バイアス電圧の制御で可変円偏波のアンテナが実現できる。

11. まとめ

マイクロストリップアンテナは、薄型かつ軽量な特徴を持つために、移動体無線通信や無線センサー技術などに有用なアンテナの一つである。一方で、無線システムの多様化で多機能のアンテナが求められている。そのため、多くの研究者が、多種の多機能アンテナを提案し、その研究結果の報告をしている。アンテナにマイクロ波機能回路を複合することで多機能化を実現できる。マイクロストリップアンテナは、その形状よりマイクロ波機能回路との接合性に優れているために、複合化したアンテナを構成するのに適している。ここでは、このマイクロストリップアンテナについてアンテナの共振モードの着目し、その基本動作や特性について説明した。さらには、マイクロストリップアンテナの多機能化の手法について、複合コンセプトと基本的な動作原理、実際のアンテナの事例を挙げて簡単に説明を行った。

文 献

- [1] J. Q. Howell, "Microstrip Antennas," IEEE Trans. Antennas Propag., vol AP-23, no. 1, pp. 90-93, Jan. 1975.
- [2] K. R. Carver and J. W. Mink, "Microstrip Antenna Technology," IEEE Trans. Antennas Propag., vol AP-29, no. 1, pp. 2-24, Jan. 1981.
- [3] R. L. Haupt and M. Lanagan, "Reconfigurable Antennas," IEEE Antennas and Propagat., Mag., vol. 55, no. 1, pp. 49-61, March 2013.
- [4] J. Costantine, Y. Tawk, S. E. Barbin, and C. G.

- Christodoulou, "Reconfigurable Antennas: Design and Applications," Proceedings of the IEEE, vol. 103, no. 3, pp.424-437, April 2015.
- [5] J. T. Aberle, S. H. Oh, D. T. Auckland, and S. D. Rogers, "Reconfigurable antennas for portable wireless devices," IEEE Antennas Propag. Mag., vol. 45, no. 6, pp. 148-154, Dec. 2003.
- [6] D. Peroulis, K. Sarabandi, and L. P. B. Katehi, "Design of reconfigurable slot antenna," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 53, pp. 645-654, Feb. 2005.
- [7] T. Y. Han and C. T. Huang, "Reconfigurable monopolar patch antenna," Electron. Lett., vol. 46, pp. 199-200, 2010.
- [8] 虫明, アンテナ入門, オーム社, 昭和 37 年 7 月.
- [9] 羽石, 平澤, 鈴木, 小形・平面アンテナ, 電子情報通信学会, 平成 8 年 8 月.
- [10] M. Aikawa and E. Nishiyama, "Compact MIC Magic-T and the Integration With Planar Array Antenna," IEICE Transactions on Electronics, vol.E95-C, no.10, pp.1560-1565, October 2012.
- [11] 相川, 西山, 田中, 豊田, "ワイヤレスモジュールの機能高度化へ向けた波動信号処理の一アプローチ—波動位相情報の活用・変換・制御と RF 演算処理機能の複合化—," 電子情報通信学会論文誌(C), vol.J95-C, no.12, pp.470-477, 2012 年 12 月.

著者紹介

西山 英輔 佐賀大学理工学部 准教授,
nisiyama@ceng.ec.saga-u.ac.jp